



## 高性能Nd-Fe-B系焼結磁石用原料合金の開発

著者	山本 和彦
号	62
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工博第5511号
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/00125043">http://hdl.handle.net/10097/00125043</a>

	やまもと	かずひこ
氏 名	山 本	和 彦
授 与 学 位	博士 (工学)	
学位授与年月日	平成30年3月27日	
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項	
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 知能デバイス材料学専攻	
学 位 論 文 題 目	高性能Nd-Fe-B系焼結磁石用原料合金の開発	
指 導 教 員	東北大学教授 杉本 諭	
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 杉本 諭	東北大学教授 安斎 浩一
	東北大学教授 今野 豊彦	

## 論文内容要旨

CO<sub>2</sub>排出量削減の駆動力となる電気自動車、省エネルギーの決め手となる高効率モータ、クリーンエネルギー源の有力候補である風力発電に用いられる高性能Nd-Fe-B系焼結磁石は今後も大幅な使用量拡大が見込まれている。本研究では、Nd-Fe-B系焼結磁石の原料合金の組織が磁石特性に大きな影響を及ぼすことに着目し、原料合金として適切な組織が得られる casting 方法と casting 条件について検討した。本論文はこれらをまとめたものであり、全編七章からなる。

第1章は緒論であり、研究の背景と目的を述べている。一般的な磁石作製工程を考慮して高性能Nd-Fe-B系焼結磁石を得るための目標組織を設定した。そしてこの目標組織を得るために、従来法より厚みの薄い金型 casting 法、薄板 casting 法、ストリップキャスト法を選択し、得られる組織と作製条件について検討することを研究内容としている。

第2章では、従来のブックモールド casting 法を用い厚みの薄い板状インゴットの組織を調査した。その結果、磁石特性に悪影響を及ぼす $\alpha$ -Fe相を抑制することはできず、得られた合金組織は目標組織のおよそ10倍程度大きい。これらの結果より従来のブックモールド casting 法は原料合金の作製方法としては不向きであることを結論付けた。

第3章では、薄板 casting 法を用いてさらに厚みの薄いインゴットを作製し、その組織を調査した。その結果、 $\alpha$ -Feは大幅に抑制できたが、目標の組織を得ることはできなかった。しかし、冷却面から0.3 mmの範囲では目標である4  $\mu$ m以下のRリッチ相間隔を有する組織が得られる可能性が示唆された。

第4章では、ストリップキャスト合金の組織を調査し、合金の組織を形態と結晶方位よりディスク、プリデンドライト、プレリナリーデンドライト、デンドライトの4種類に分類した。合金内部に $\alpha$ -Feは認められず、冷却面近傍のディスク、プリデンドライト、プレリナリーデンドライトは磁気特性に悪影響を及ぼす可能性を見出した。そのため目標組織を得るためには、核発生とデンドライト成長の制御が重要であると結論付けた。

第5章では、核発生の制御を目的として冷却ロールの表面粗さとディスク、プリデンドライトの分布について調べた。その結果、表面粗度を調整することによってディスク、プリデンドライトの量を抑制する事が可能であることを見出した。

第6章では、デンドライト成長の制御を目的として casting 温度、周速度、温度拡散率、表面粗さを変化させRリッチ相間隔への影響について調査し、その最適条件 ( casting 温度  $T_{cast} = 1580^{\circ}\text{C}$ 、ロール周速度  $V_s = 1.0 \text{ m/sec}$ 、ロール温度拡散率  $a = 104 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$ 、ロールの表面粗さ  $Ra = 4 \mu\text{m}$ ) で合金を作製した結果、目標組織を実現した。さらに、凝固計算ソフトを用いた計算より、目標組織を得るための温度範囲  $1100 \sim 1000^{\circ}\text{C}$  の冷却速度は、冷却面から0.03 mmの位置において約  $1 \times 10^6 \text{ }^{\circ}\text{C/sec}$  であると結論付けた。

第7章は、本論文を総括した結論である。

# 論文審査結果の要旨

CO<sub>2</sub>排出量削減の駆動力となる電気自動車、省エネルギーの決め手となる高効率モータ、クリーンエネルギー源の有力候補である風力発電に用いられる高性能 Nd-Fe-B 系焼結磁石は今後も大幅な使用量拡大が見込まれている。本研究では、Nd-Fe-B 系焼結磁石の原料合金の組織が磁石特性に大きな影響を及ぼすことに着目し、原料合金として適切な組織が得られる鑄造方法と鑄造条件について検討した。本論文はこれらをまとめたものであり、全編7章からなる。

第1章は緒論であり、研究の背景と目的を述べている。一般的な磁石作製工程を考慮して高性能 Nd-Fe-B 系焼結磁石を得るためには、原料合金における希土類 (R) リッチ相間隔が 4  $\mu\text{m}$  以下となる必要があるという目標組織を設定している。また、この目標組織を得るために、従来法より厚みの薄い金型鑄造法、薄板鑄造法、ストリップキャスト法を選択し、得られる組織と作製条件について検討することを研究内容とすることを述べている。

第2章では、従来のブックモールド鑄造法を用い厚みの薄い板状インゴットの組織を調査している。その結果、磁石特性に悪影響を及ぼす  $\alpha\text{-Fe}$  相の出現を抑制できず、得られた合金組織も目標組織のおよそ 10 倍程度になることを示している。これらの結果より、従来のブックモールド鑄造法は、原料合金の作製方法としては不向きであることを結論付けている。

第3章では、薄板鑄造法を用いて、さらに厚みの薄いインゴットを作製し、その組織を調査している。その結果、 $\alpha\text{-Fe}$  の出現は大幅に抑制されたが、目標組織までには至らなかったことを示している。しかし、冷却面から 0.3 mm の範囲では、目標の 4  $\mu\text{m}$  以下の R リッチ相間隔を有する組織が得られる可能性があることを述べている。

第4章では、ストリップキャスト合金の組織を調査し、合金の組織を形態と結晶方位よりディスク、プリデンドライト、プレリナリーデンドライト、デンドライトの4種類に分類している。合金内部に  $\alpha\text{-Fe}$  は認められず、冷却面近傍のディスク、プリデンドライト、プレリナリーデンドライトが磁気特性に悪影響を及ぼす可能性を見出している。そのため、目標組織を得るためには、核発生とデンドライト成長の制御が重要であると結論付けている。

第5章では、核発生の制御を目的として冷却ロールの表面粗さとディスク、プリデンドライトの分布について調べている。その結果、表面粗度を調整することによって、ディスク、プリデンドライトの量の制御が可能であることを見出している。

第6章では、デンドライト成長の制御を目的として、鑄造温度、周速度、温度拡散率、表面粗さを変化させて R リッチ相間隔への影響について調査し、その最適条件 (鑄造温度  $T_{\text{cast}} = 1580^{\circ}\text{C}$ 、ロール周速度  $V_s = 1.0 \text{ m/sec.}$ 、ロール温度拡散率  $a = 104 \times 10^6 \text{ m}^2/\text{sec.}$ 、ロールの表面粗さ  $R_a = 4 \mu\text{m}$ ) にて合金を作製した結果、目標組織を実現している。さらに、凝固計算ソフトを用いた計算より、目標組織を得るための温度範囲 1100  $\sim$  1000  $^{\circ}\text{C}$  の冷却速度は、冷却面から 0.03 mm の位置において約  $1 \times 10^6 \text{ }^{\circ}\text{C/sec.}$  であると結論付けている。

第7章は、本論文を総括した結論である。

以上、要するに本論文は、世界に先駆けて高性能 Nd-Fe-B 系焼結磁石の原料合金の作製法としてストリップキャスト法に着目し、その作製条件と組織の関係を明確化させたものであり、永久磁石材料研究における本鑄造法の実用化の礎を築いた過程をまとめたものといえる。今日の高性能 Nd-Fe-B 系焼結磁石の原料合金のほとんどがストリップキャスト法にて作製されている現状を考えると、本研究において得られた成果は、Nd-Fe-B 系磁石のみならず、永久磁石材料や磁性材料の性能向上に向けて重要な知見を与えるものであり、知能デバイス材料学の発展に寄与するところ少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。